ارائهٔ روش خمکاری لوله‌ها به‌کمک ماندرل سیمی به‌عنوان روشی جدید*

(یادداشت پژوهشی)

محمدرضا رجبی(۱) مسعود رضایی‌زاده(۲) سید یوسف احمدی بروغنی(۳)

چکیده *لوله‌های خمکاری‌شده به‌طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. در این تحقیق مواد مختلفی به‌عنوان ماندرل استفاده شده است و این نتیجه به‌دست آمد که استفاده از یک دسته سیم انعطاف‌پذیر به‌عنوان ماندرل نسبت به سایر روش‌ها مفیدتر می‌باشد. ازجمله مزیت‌های مهم ماندرل سیمی دوام، کاربرد ساده و خارج شدن آسان پس از فرایند خمکاری است. تغییرشکل سطح مقطع، کاهش ضخامت و ایجاد ترک در شعاع بیرونی خم، چروکیدگی در شعاع داخلی خم، برگشت فنری و تغییرضخامت ازجمله عیوب رایج به‌همراه فرایند خمکاری لوله‌ها می‌باشند. در این مطالعه به بررسی تأثیر ماندرل سیمی برروی پارامترهای ذکرشده به دو روش شبیه‌سازی المان‌محدود و آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.*

واژه‌های کلیدی خم لوله; ماندرل سیمی; تغییرشکل سطح مقطع; برگشت فنری; تغییر ضخامت.

A New Method for Representation of Pipe Bending Process Using Wire Mandrel

M.R. rajabi M. rezaei zadeh S.Y. Ahmadi brooghani

Abstract *Bent pipes have been widely used in industrial usage. In this work different materials have been used as mandrel and it is realized that a bunch of flexible wire is more preferable to optimize bending parameters. This way doesn't need laborious adjustments and because common flexible wires have plastic deformation even during excessive bending angles, they can be used so many times and also they are easy to remove after bending process. Cross section distortion, cracking at the extrados, wrinkling at the intrados, spring back phenomenon and wall thickness change are issues associated with pipe bending. In this work the effect of flexible wires on bending parameters has been analyzed and the results are confirmed with finite element simulation.*

Key Words pipe bending; wire mandrel; cross section distortion; spring back; wall thickness change

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۵/۶ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۱ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i1.37810

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشجوی دکتری مکانیک گرایش طراحی کاربردی، دانشگاه بیرجند. mrr23mrr@yahoo.com
(۲) استادیار، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و علوم پیشرفتهٔ صنعتی، کرمان.
(۳) استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

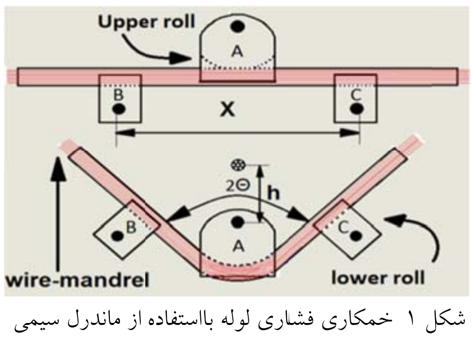
در سال‌های اخیر خم‌های لوله با وزن پایین و کیفیت بالا در صنایع مختلف کاربرد زیادی پیدا کرده‌اند، بنابراین چندین روش متفاوت برای بهبود کیفیت خمکاری لوله پیشنهاد شده است. روشی که برای این منظور استفاده می‌شود باید مؤثر، دقیق، با محدودیت کم، و دارای کاربرد ساده و آسان باشد. تانگ [2000] در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده است که هر چه اصطکاک بین قالب نگهدارندهٔ لوله و قالب خمکاری لوله با لوله بیشتر باشد، کیفیت خمکاری افزایش پیدا می‌کند. همچنین هرچه اصطکاک بین لوله و ماندرل زیادتر باشد کیفیت خمکاری کمتر می‌شود. ژانگ [2003] به‌صورت عددی تأثیر فشار داخلی و اصطکاک را برروی خم‌های لوله مورد بررسی قرار داده است و این نتیجه حاصل شده است که خم‌های با شعاع کم را می‌توان با روان‌کاری و فشار داخلی مشخصی به‌دست آورد. لین [2003] پارامترهای ماندرل توپی را برروی کیفیت خمکاری لوله‌هایی با جنس‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. ماندرل‌های توپی تنظیمات حساسی دارند و بعضی اوقات خارج کردن آنها از ناحیهٔ خم مشکل‌ساز می‌شود و به سیستم هیدرولیکی خاصی برای خروج توپی‌ها از ناحیهٔ خمکاری نیاز می‌باشد. ژانگ[2005] برروی خمکاری به‌کمک لیزر مطالعاتی را انجام داد. این روش دارای مزیت‌هایی ازقبیل سرعت بالا و عدم تماس با ناحیهٔ خمکاری می‌باشد ولی این روش برای خمکاری لوله‌های جدار نازک و با شعاع خمکاری کم دارای محدودیت است. آشیماس [2007] به‌کمک شبیه‌سازی به بررسی هیدروفرمینگ پرداخت. گودرزی [2007] روش خمکاری برشی را برای دستیابی به شعاع‌های خمکاری کم مورد مطالعه قرار داد. در این روش برای خمکاری لوله، تغییرشکل برشی در ناحیهٔ خمکاری ایجاد می‌شود. یان [2010] تأثیر اعمال کردن نیروی محوری به لوله برای بهبود کیفیت خمکاری را مورد بررسی قرار داد.

در این تحقیق ماندرل سیمی به‌عنوان یک روش مؤثر و ساده برای بهبود کیفیت خمکاری معرفی می‌شود و مورد بررسی قرار می‌گیرد. ماندرل سیمی متشکل از یک دسته از سیم‌های انعطاف‌پذیر است که در درون لوله قرار می‌گیرد. نتایج آزمایش و شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ماندرل سیمی به‌میزان زیادی می‌تواند کیفیت خمکاری لوله را افزایش دهد. ماندرل سیمی می‌تواند به‌راحتی استفاده شود و پس از خمکاری می‌توان به‌راحتی آن را از ناحیهٔ خمکاری‌شده خارج نمود و به‌دلیل این‌که سیم‌ها دچار تغییرشکل پلاستیک نمی‌شوند، قابلیت استفادهٔ مجدد را دارا می‌باشند.

علاوه‌بر مورد ذکرشده روان‌کاری فضای بین ماندرل سیمی و لوله باعث می‌شود که پس از خمکاری بتوان به‌راحتی و توسط نیروی یک دست سیم‌ها را از درون خم به بیرون کشید. بدین ترتیب که با خارج کردن یکی از سیم‌ها از درون لوله فضا باز می‌شود و سایر سیم‌ها به‌سادگی خارج می‌شوند. مزیت دیگر ماندرل سیمی این است که می‌توان این روش را برای لوله‌های با قطر کم یا زیاد، جدار نازک یا ضخیم و لوله‌های غیر دایروی در شعاع‌های خمکاری کم نیز استفاده نمود. کیفیت خمکاری با افزایش تعداد سیم‌های درون لوله افزایش پیدا می‌کند، بنابراین قبل از خمکاری باید در حد امکان لوله را از ماندرل سیمی پر کرد. ماندرل‌های سیمی برخلاف ماندرل‌های توپی محدودیت قطر ندارند و با تغییر قطر لوله‌ای که نیاز به خمکاری دارد می‌توان تعداد سیم‌ها را کم یا زیاد کرد. همچنین این روش محدودیت زاویهٔ خمکاری ندارد و می‌توان خم‌های با زاویهٔ خیلی کم مثلاً صفر درجه را به‌راحتی ایجاد نمود و به‌دلیل انعطاف‌پذیر بودن سیم‌ها می‌توان از آنها مجدداً استفاده کرد.

اصول خمکاری فشاری

دستگاهی که برای خمکاری استفاده شد متشکل از غلطک‌های ثابت B و C است، درحالی‌که غلطک A می‌تواند با بازوی پرس جابه‌جا شود (شکل ۱). برای انجام دادن خمکاری، لوله برروی غلطک‌های B و C قرار می‌گیرد و این در حالی است که غلطک A به‌صورت عمود بر لوله حرکت می‌کند و باعث می‌شود لوله خم شود. شعاع و زاویهٔ خمکاری توسط پارامترهای x و h کنترل می‌شوند. فاصلهٔ بین غلطک‌های B و C می‌تواند با جابه‌جایی افقی غلطک‌ها صورت بگیرد. سه غلطک برروی سطحی قرار گرفته‌اند و لوله می‌تواند بین آنها قرار بگیرد. ابعاد غلطک‌ها متناسب با قطر لوله می‌باشد. شعاع خمکاری مستقل از شعاع غلطک‌ها است و به موقعیت سه غلطک بستگی دارد. بااستفاده از این روش می‌توان شعاع‌های خمکاری مختلفی را با غلطک‌های یکسان به‌دست آورد. شعاع خمکاری را بااستفاده از x و h می‌توان محاسبه نمود. 2θ زاویهٔ خم می‌باشد و h فاصلهٔ پیموده‌شده توسط غلطک A است. ماندرل سیمی در (شکل ۲) نشان داده شده است. قطر سیم‌های ماندرل $1.8mm$ بوده است. برای انجام فرایند خمکاری لوله توسط ماندرل سیمی پر می‌شود و روان‌کاری نیز صورت می‌پذیرد.



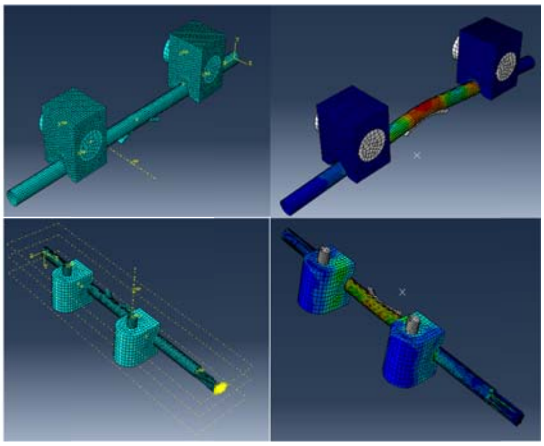
شکل ۱ خمکاری فشاری لوله بااستفاده از ماندرل سیمی



شکل ۲ ماندرل سیمی

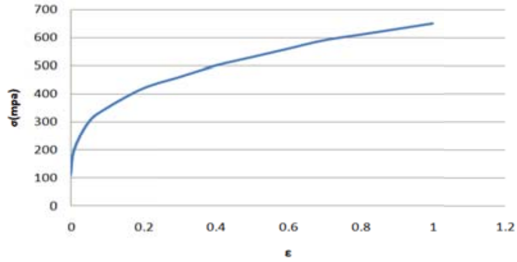
شبیه‌سازی المان‌محدود

مدل‌سازی المان‌محدود توسط نرم‌افزار آباکوس برای بررسی تأثیر ماندرل سیمی به‌منظور بهینه‌سازی عیوب رایج خمکاری لوله و بررسی پارامترهایی که با روش‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نبود، انجام شد. فرایند خمکاری لوله بااستفاده و بدون استفاده از ماندرل سیمی به‌شکل یک فرایند سه‌بعدی الاستیک-پلاستیک شبیه‌سازی گردید. قالب‌ها به‌صورت صلب مدل شده‌اند، جنس لوله فولاد OLT 35(STAS 8183 − 87) می‌باشد، مدول الاستیک $E = 2.1x10^5$ [N / mm2] و ضریب پواسون 0.3 است. ضریب اصطکاک بین غلطک‌ها و لوله ۰/۱ اعمال گردید. ماندرل سیمی به‌شکل "Wire" مدل شده است و رفتار آن به‌صورت الاستیک می‌باشد. قطر لوله "1/2 با ضخامت 1mm است. نهایتاً مدل المان‌محدود خمکاری همانند (شکل ۳) ایجاد شد.



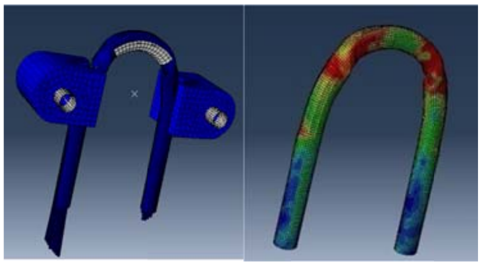
شکل ۳ شبیه‌سازی فرایند خمکاری لوله بااستفاده از ماندرل سیمی

برای به‌دست آوردن خواص مکانیکی لوله، آزمایش کشش برای آن صورت گرفته است و شکل (٤) منحنی تنش (σ)- کرنش (ε) حقیقی را برای توصیف رفتار ماده طی فرایند شبیه‌سازی نشان می‌دهد. مدل کرنش سختی به‌شکل $\overline{\sigma} = 723.1\bar{\varepsilon}^{0.3}$ می‌باشد.



شکل ٤ منحنی تنش– کرنش حاصل از تست کشش ماده

بااستفاده از ماندرل سیمی می‌توان زوایای خمکاری بسیار کم را به‌دست آورد (شکل ٥).



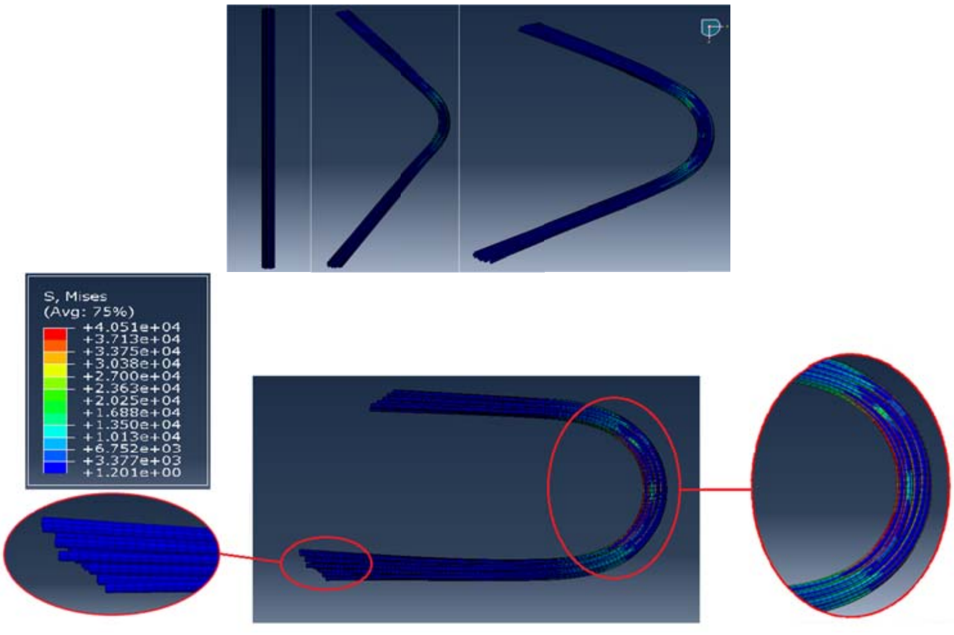
شکل ٥ خمکاری با زوایای بسیار کم توسط ماندرل سیمی

نتایج آزمایش (شکل ٦) بیانگر این است که ماندرل سیمی به‌میزان چشم‌گیری کیفیت خمکاری لوله را افزایش می‌دهد.



شکل ٦ نمونه‌ای از خم‌های به‌دست‌آمده توسط آزمایش (خم بااستفاده از ماندرل سیمی در پایین و خم بدون استفاده از ماندرل سیمی در بالا نشان داده شده است)

به‌دلیل عدم تغییرشکل پلاستیک سیم‌ها و انعطاف‌پذیر بودن آنها، قابلیت استفادهٔ مجدد را دارا می‌باشند. ماندرل سیمی همچنین باید از استحکام کافی برخوردار باشد تا بتواند تنش‌های موجود را تحمل نماید و درنتیجه کیفیت خمکاری را افزایش دهد. محاسبهٔ تنش‌های اعمالی بر ماندرل سیمی به‌صورت تجربی امکان‌پذیر نبود و این کار توسط نرم‌افزار شبیه-سازی شده است. انعطاف‌پذیری ماندرل سیمی و توزیع تنش در ناحیهٔ خمکاری در (شکل ٧) نشان داده شده است.

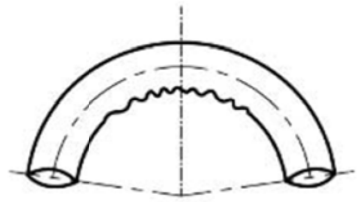


شکل ٧ انعطاف‌پذیری ماندرل سیمی و توزیع تنش روی آن

بررسی عیوب رایج در خمکاری لوله

معمولاً در فرایند خمکاری عیوب مختلفی نظیر ترک، چروکیدگی، بیضی‌شدن مقطع، برگشت فنری و کاهش ضخامت در ناحیهٔ خمکاری به‌وجود می‌آید که این عیوب بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند. در این تحقیق وضعیت عیوب مذکور در خم‌های مختلف بررسی شده و همچنین تأثیر ماندرل‌های سیمی بر عیوب مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

چروکیدگی. در حین خمکاری جدارهٔ شعاع داخلی خم به‌دلیل تنش‌های مضاعف صفحه‌ای ضخیم می‌شود و پس از رسیدن این تنش‌ها به حد بحرانی، امکان ایجاد چروکیدگی وجود دارد. چروکیدگی نه‌تنها مقاومت لوله را کاهش می‌دهد بلکه روی استحکام و عمر خستگی آن نیز تأثیر می‌گذارد. چروکیدگی به‌عنوان یک محدودیت برای خمکاری می‌تواند باعث آسیب رسیدن به ابزار خمکاری بشود. یکی از دلایل ناپایداری چروکیدگی در اثر وجود تنش محوری ناشی از انتخاب ابعاد نامناسب قالب‌های خمکاری می‌باشد. شماتیک چروکیدگی در (شکل ۸) نشان داده شده است.



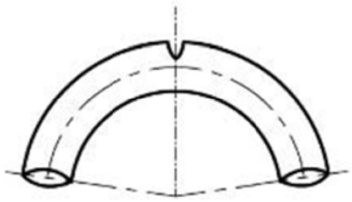
شکل ۸ چروکیدگی در شعاع داخلی خم

پدیدهٔ چروکیدگی به عوامل زیادی همانند خواص ماده، ابعاد لوله، نوع بارگذاری و شرایط تماس بستگی دارد. همچنین این پدیده در شعاع‌های خمکاری کم و لوله‌های با قطر زیاد رایج‌تر می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش نشان می‌دهد که ماندرل سیمی به‌میزان قابل ملاحظه‌ای از تمرکز چروکیدگی جلوگیری می‌کند و سطح لوله در شعاع داخلی خم را صاف و یکنواخت می‌نماید (شکل ۹). اصطکاک، میزان لقی بین لوله و ابزار و همچنین کافی بودن تعداد سیم‌های ماندرل ازجمله پارامترهای کلیدی برای برطرف نمودن چروکیدگی هستند.



شکل ۹ چروکیدگی در شعاع داخلی خم [خم ایجادشده بااستفاده از ماندرل سیمی (پایین) و خم ایجادشده بدون استفاده از ماندرل سیمی (بالا)]

کاهش ضخامت. کاهش ضخامت در شعاع خارجی جدارهٔ لوله پدیده‌ای دیگر است که همیشه با خمکاری لوله همراه می‌باشد. کاهش ضخامت در جدارهٔ لوله بر میزان فشار داخلی که لوله تحمل می‌کند، تأثیر می‌گذارد و قابلیت اطمینان لوله را کم می‌کند. شماتیک کاهش ضخامت و ایجاد ترک در جدارهٔ لوله در (شکل ۱۰) نشان داده شده است.

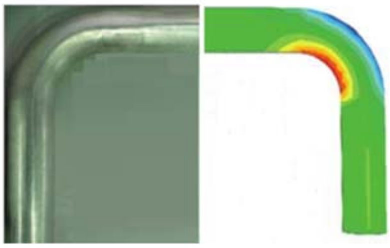


شکل ۱۰ کاهش ضخامت در شعاع خارجی خم

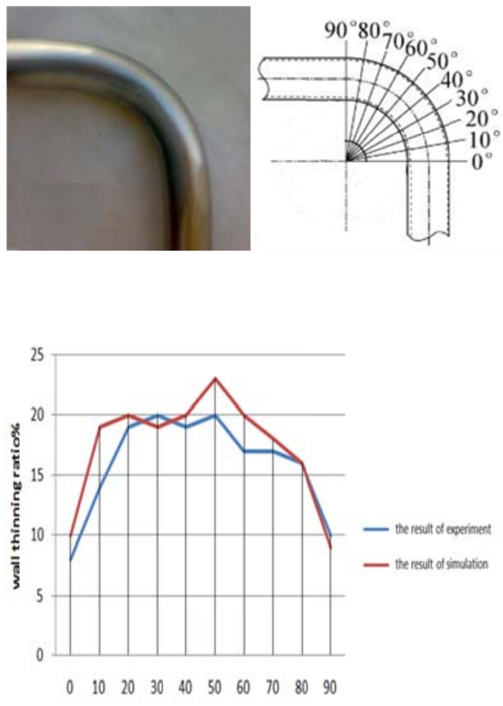
با توجه به قرارداشتن شعاع خارجی خم در معرض تنش کششی، جدارهٔ آن نازک می‌شود. این در حالی است که شعاع داخلی خم به‌دلیل اعمال تنش فشاری بر آن ضخیم می‌شود. درصد کاهش ضخامت در خم لوله (T) از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید.

$$T = 100\% \times (t_0 - t_{min}) / t_0 \qquad (۱)$$

Contour plot توسط شبیه‌سازی برای توزیع ضخامت در لوله و همچنین مدل آزمایشگاهی متناظر با آن در (شکل ۱۱) نشان داده شده است. خم 90° با قطر ″½ و ضخامت $1mm$ می‌باشد و توسط ماندرل سیمی ایجاد شده است.

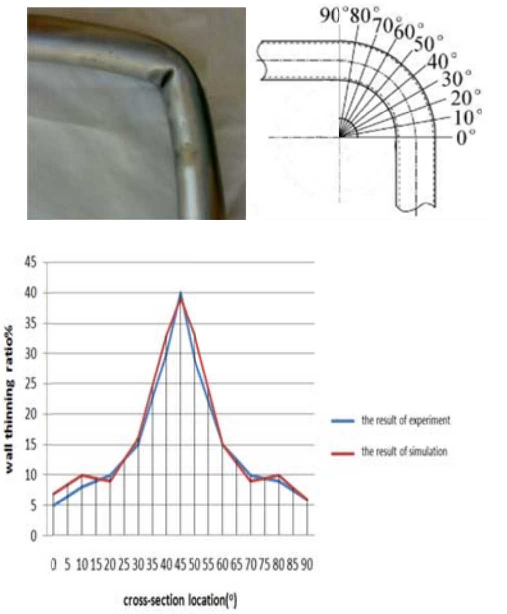


شکل ۱۱ نتایج شبیه‌سازی و آزمایش



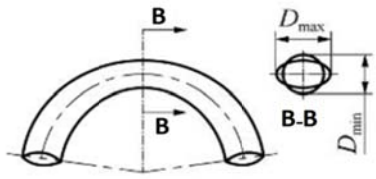
شکل ۱۲ مقایسهٔ درصد کاهش ضخامت در شعاع خارجی خم لوله برای خم آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌شده باستفاده از ماندرل سیمی

شکل کلی منحنی درصد کاهش ضخامت برای قطرهای مختلف لوله تقریباً یکسان است. همان‌طور که در (شکل‌های ۱۲ و ۱۳) نشان داده شده است، کاهش ضخامت برای خم‌های بدون ماندرل سیمی در زاویهٔ 45° متمرکز است و این در حالی است که باوجود ماندرل سیمی کاهش ضخامت در سراسر شعاع داخلی خم توزیع می‌شود و یکنواخت‌تر می‌باشد. همچنین باوجود ماندرل سیمی درصد کاهش ضخامت به‌میزان ۱۷.۵% نسبت به وضعیت بدون ماندرل سیمی کاهش یافته است. نتایج شبیه‌سازی المان‌محدود بیانگر این است که ماندرل سیمی حداکثر میزان کاهش ضخامت در جدارهٔ لوله را 46.5% کاهش داده است و همچنین نتایج آزمایش این مقدار را 50% نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ مقایسهٔ درصد کاهش ضخامت در شعاع خارجی خم لوله برای خم آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌شده بدون استفاده از ماندرل سیمی

تغییرشکل سطح مقطع. عیب دیگری که با فرایند خمکاری همراه است، تغییرشکل سطح مقطع لوله می‌باشد. در این حالت مقطع خم از حالت دایروی خارج می‌شود و شعاع خارجی خم دچار فرورفتگی می‌شود. این پدیده برروی عبور جریان سیال در لوله تأثیر می‌گذارد. شماتیک تغییرشکل سطح مقطع در (شکل ١٤) نشان داده شده است.



شکل ١٤ تغییرشکل سطح مقطع خم

ماندرل سیمی به‌میزان چشم‌گیری از تغییرشکل مقطع لوله و فرورفتگی شعاع خارجی خم جلوگیری می‌کند (شکل ١٥).


شکل ١٥ فرورفتگی شعاع خارجی خم [خم ایجادشده بااستفاده از ماندرل سیمی (پایین) و خم ایجادشده بدون استفاده از ماندرل سیمی (بالا)]

بیشترین میزان تغییرشکل سطح مقطع با (Q) نشان داده می‌شود که این ترم درصد بیضی‌شدگی نیز نامیده می‌شود (معادلهٔ ٢).

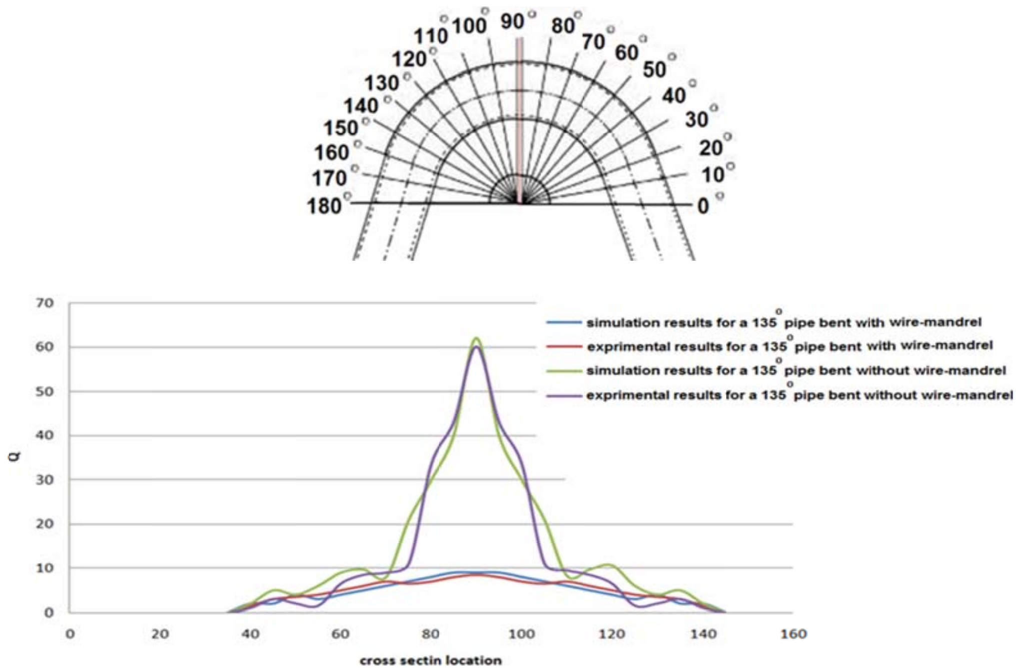
$$Q = 100\% \times (D0 - D') / D0 \qquad (٢)$$

ترم Q برای خم °١٣٥، °٩٠، °٤٥ در شکل‌های (١٨-١٦) نشان داده شده است.

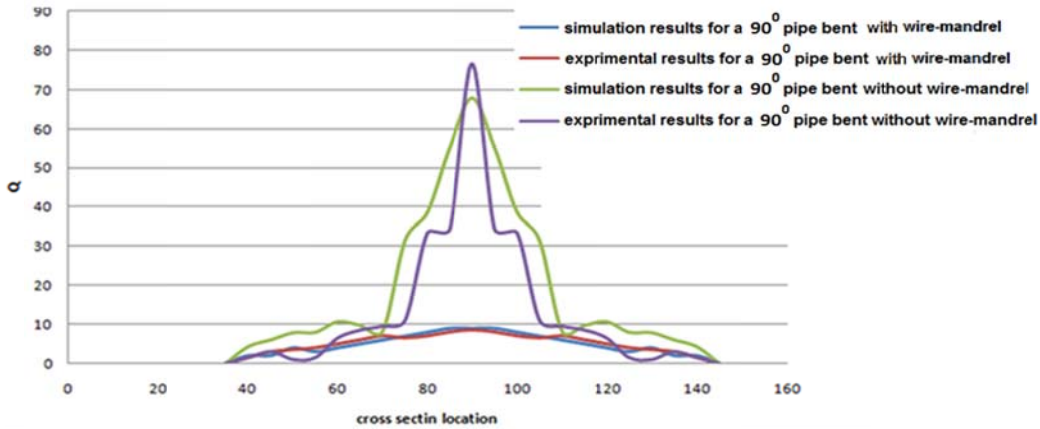
برای خم °135 نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ماندرل سیمی بیشترین میزان بیضی‌شدگی را 90% کاهش می‌دهد و همچنین این درصد کاهش برای نتایج آزمایش 92% است.

برای خم °90 نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ماندرل سیمی بیشترین میزان بیضی‌شدگی را 87% کاهش می‌دهد و همچنین این درصد کاهش برای نتایج آزمایش 88% می‌باشد.

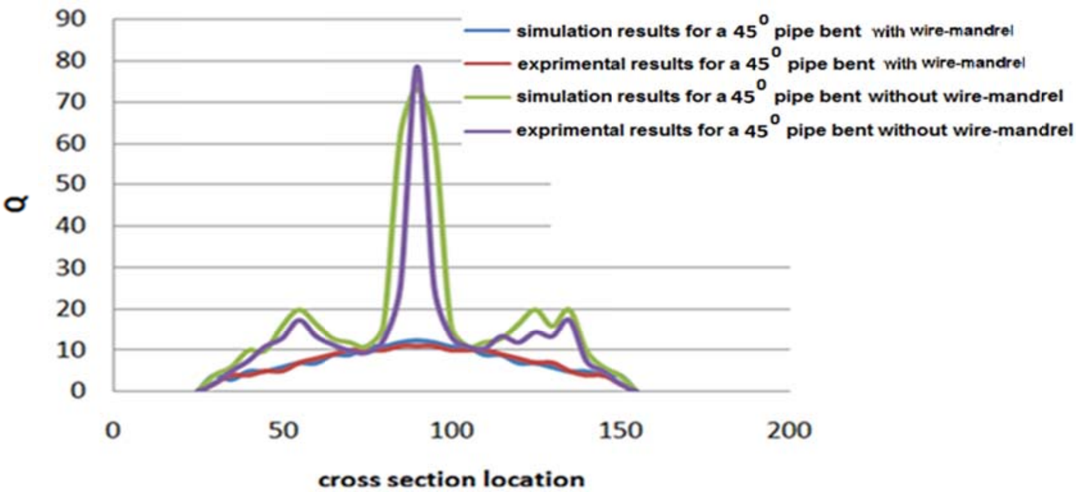
برای خم °45 نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که ماندرل سیمی بیشترین میزان تغییرشکل مقطع را 86% کاهش می‌دهد و همچنین این درصد کاهش برای نتایج آزمایش 88% می‌باشد.



شکل ١٦ نتایج شبیه‌سازی و آزمایش برای خم °١٣٥ برای لوله با قطر ”1/2

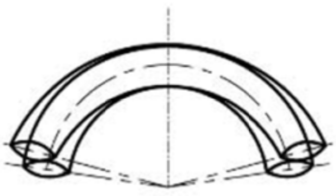


شکل ۱۷ نتایج شبیه‌سازی و آزمایش برای خم ۹۰° برای لوله با قطر”1/2



شکل ۱۸ نتایج شبیه‌سازی و آزمایش برای خم ٤٥° و برای لوله با قطر ”1/2

برگشت فنری. برگشت فنری ناشی از برگشت ناحیهٔ الاستیک ماده پس از باربرداری است. پس از باربرداری شعاع خارجی خم در اثر تنش کششی و شعاع داخلی خم در اثر تنش فشاری مقداری تغییرشکل پیدا می‌کند و درنتیجه شعاع و زاویهٔ خمکاری مقداری زیاد می‌شود. برگشت فنری از این منظر دارای اهمیت است که برروی دقت، هندسهٔ خمکاری، اتصال و آب‌بندی خم با سایر اجزا تأثیر می‌گذارد. شماتیک برگشت فنری در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



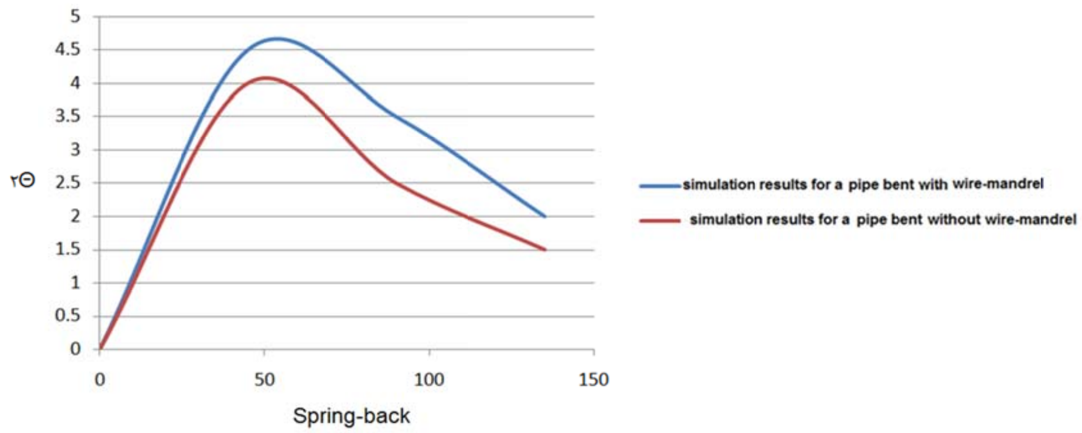
شکل ۱۹ برگشت فنری در خم

پدیدهٔ برگشت فنری یکی از معایبی است که از کیفیت خمکاری کم می‌کند و هزینهٔ قالب خمکاری و محصول را افزایش می‌دهد و همچنین کارایی تولید را دچار ضعف می‌نماید. باتوجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات، درصورتی‌که زاویهٔ خمکاری بزرگ باشد

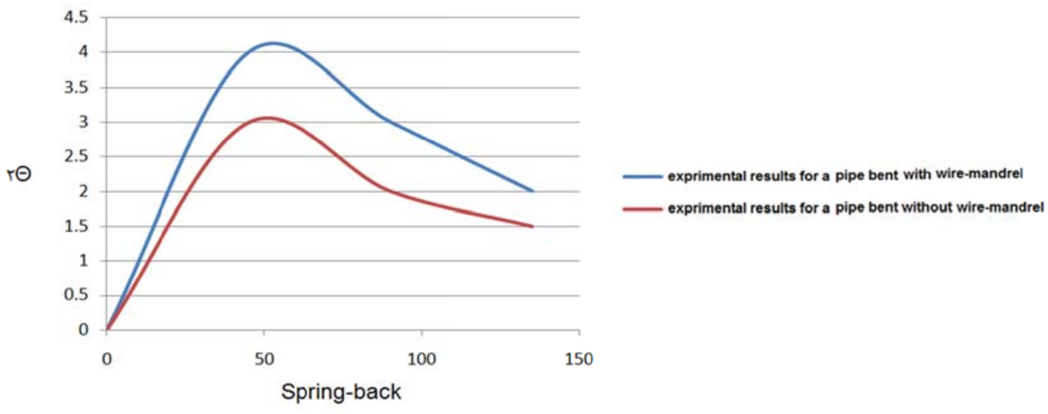
برگشت فنری رابطهٔ خطی با زاویهٔ خمکاری دارد. نتایج تجربی درمورد برگشت فنری درصورتی قابل اعتماد می‌باشند که برای شرایط خمکاری یکسان استفاده شود. کورشی (1999) بااستفاده از شبیه‌سازی المان‌محدود به‌همراه نتایج آزمایشگاهی به این نتیجه رسید که در شرایط خمکاری یکسان توان کارسختی تأثیر کمی برروی برگشت فنری دارد.

نتایج شبیه‌سازی و آزمایش نشان می‌دهد (شکل‌های ۲۰ و ۲۱) که میزان برگشت فنری برای خم حاوی ماندرل سیمی خیلی متفاوت از برگشت فنری برای خم بدون ماندرل سیمی نمی‌باشد و دلیل عمدهٔ این موضوع انعطاف‌پذیری سیم‌ها است.

این موضوع کاملاً روشن و طبیعی است که درصورت استفاده از هرگونه ماندرل در داخل لوله برگشت فنری مقداری بیشتر از حالت بدون استفاده از ماندرل سیمی می‌شود. در شرایط یکسان خمکاری میزان برگشت فنری برای ماندرل سیمی نسبت به سایر انواع رایج ماندرل بیشتر نیست و دلیل این موضوع انعطاف‌پذیری سیم‌ها است. درصورتی‌که سیم‌ها انعطاف‌پذیر نباشند برگشت فنری سیم‌ها با برگشت فنری لوله جمع می‌شود و میزان کلی برگشت فنری افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۲۰ نتایج شبیه‌سازی برای برگشت فنری لوله



شکل ۲۱ نتایج آزمایشگاهی برای برگشت فنری لوله

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر ماندرل سیمی بر کیفیت خمکاری لوله به‌عنوان یک روش ساده و کارا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی المان‌محدود و آزمایشگاهی بیانگر این است که ماندرل سیمی تأثیر زیادی بر بهبود عیوب رایج در خمکاری و افزایش کیفیت خم دارد. چروکیدگی در شعاع داخلی خم، کاهش ضخامت و فرورفتگی در شعاع خارجی خم، تغییرشکل مقطع و برگشت فنری در دو حالت خمکاری با و بدون استفاده از ماندرل سیمی مورد بررسی قرار داده شد و این نتیجه حاصل گردید که ماندرل سیمی از کاهش مقطعی ضخامت به‌میزان ۱۷.۵% جلوگیری می‌کند و همچنین توزیع ضخامت را در طول خم یکنواخت می‌نماید. میزان تغییرشکل مقطع 90% کاهش می‌یابد و فرورفتگی شعاع خارجی خم کاملاً حذف می‌گردد. در شرایط یکسان خمکاری میزان برگشت فنری برای خمکاری بااستفاده از ماندرل سیمی کمتر از ۱/۳ برابر برگشت فنری برای حالت بدون استفاده از ماندرل سیمی است و این مقدار نسبت به سایر انواع رایج ماندرل بیشتر نیست و دلیل این موضوع انعطاف‌پذیری سیم‌ها می‌باشد.

مراجع

1. Liu, Z.Y., Teng, B.G. and Yuan, S.J., "Effect of internal pressure on thin-walled tubes bending with internal pressure", *Journal of Plasticity Engineering*, 16(4), pp. 35-38, (2009).
2. Zeng, Y.S. and Li, Z.Q,. "Numerical simulation of the internal pressure bending process of small bend radius aluminum alloy tubular parts", *Journal of Plasticity Engineering*, 10(2), pp.14-17, (2003).
3. Lin, Y., Yang, H., Li, H. and Zhan, M., "Influence of forming parameters on the wrinkling during the NC thin-walled tube bending process", *Acta Aeronauticaet Astronautica Sinica*, 24(5), pp. 456-461, (2003).
4. Zhang, W.W., Jones, M. and Graham, M., "Large diameter and thin wall laser tube bending", *24th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, ICALEO 2005Congress Proceedings, pp. 64-73, Denver, Colorado, USA, July 17–21, (2005).
5. Achimas, Gh., Ceclan, V.A., Lazarescu, L. and Groze, F., "Experimental research concerning the influence of the bending radius on the wall thickness of the bent pipes micro CAD", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, pp. 7-11, (2007).
6. Goodarzi, M., Kuboki, T. and Murata, M., "Effect of initial thickness on shear bending process of circular tubes", *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), pp. 136-140, (2007).
7. Yan, J., Yang, H., Zhan, M. and Li, H., "Forming characteristics of Al-alloy large-diameter thin-walled tubes in NC bending under axial compressive loads", *Chinese Journal of Aeronautics*, 23(4), pp. 461-469, (2010).
8. Al-Qureshi, H.A., "Elastic-plastic analysis of tube bending", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39(1), pp. 87-104, (1999).
9. E.D.X., Ning, R. X., Gu, T., "Experiment and analysis on the distortion of cross-section of bended-tube", *Acta Armamentarii*, 27(4), pp. 698-701, (2006).
10. Li, H., Yang, H., Yan, J. and Zhan, M., "Numerical study on deformation behaviors of thin-walled tube NC bending with large diameter and small bending radius", *Computational Materials Science*, 45(4), pp. 921-934, (2009).
11. Stachowicz, F., "Bending with upsetting of copper tube elbows", *Journal of Materials Proc. Tech.*, Vol. 100, pp. 236-240, (2000).
12. Tang, N.C., "Plastic-deformation analysis in tube bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77(12), pp. 751-759, (2000).